

平成 30 年度修士論文
月面衝突閃光の低分散スペクトル I

情報理工学研究科 基盤理工学専攻
柳澤研究室

学生番号 1733024
氏名 内田有紀

指導教官 柳澤正久 教授

提出日 2019 年 2 月 27 日

概要

月面に小天体が高速度で衝突した際に生じる閃光を月面衝突閃光と呼ぶ。月の地殻構造や月の起源と進化に関する研究が月の地震計のデータ解析から行われているが、この閃光を観測することで、衝突由来の月震の震源位置や発生時刻、衝突エネルギー(小天体の運動エネルギー)がわかるため、月震研究への応用が期待されている。また、今後月の地震計が1つでも月震研究が進められるような計画が考えられており、そのサポートとして月面衝突閃光の地上観測が重要となっている。そのため本研究では、実際の観測により月面衝突閃光のスペクトルを求め、閃光をとらえるのに適した波長帯を調べた。

2018年4月21日と2018年12月15日の観測で検出された閃光について解析を行った。その結果、4月21日の閃光は黒体放射では近似できないことがわかった。これは、大気中の水蒸気の影響があった可能性と、月面衝突閃光には黒体放射ではないものが存在する可能性を示唆している。また、12月15日の閃光はすべて黒体放射で近似でき、1つを除いて閃光スペクトルは700 nm以降にピークを持つことがわかった。また、黒体放射を仮定すると、今回得られた閃光の温度は約2500~4000 Kであり、その時のピーク波長は700~1100 nmである。このことから、一般に月面衝突閃光は700~1100 nmにピークを持つと考えられるため、閃光をとらえるのに適した波長帯は700~1100 nmと考えられる。

目次

1	序論	4
2	観測	5
2.1	観測機材	5
2.2	観測方法	7
3	月面衝突閃光の検出・解析	8
3.1	検出方法	8
3.2	解析方法	9
4	結果	12
4.1	4 月 21 日の閃光	12
4.2	12 月 15 日の閃光	14
5	考察	26
5.1	4 月 21 日の閃光	26
5.2	12 月 15 日の閃光	27
6	まとめ	37
7	付録	41

1 序論

月面に小天体が高速度で衝突した際に生じる閃光を月面衝突閃光と呼ぶ。この閃光を観測することで、衝突由来の月の地震 (以下月震と呼ぶ) の震源位置や発生時刻、衝突エネルギー (小天体の運動エネルギー) がわかる。これを月の地震計のデータと合わせることで、地震波の伝わる速度などから月の地殻構造の解明、さらに月の成り立ちを推測することができる [1]。

月面衝突閃光は 1999 年に初めて観測され、以降日本やアメリカ、スペインなどで観測が行われている。一般的な閃光は 6~7 等級と非常に暗いため、月齢 3~8、23~28 までの数日間、月の夜側でしか観測ができない [2]。また、観測は天候にも左右され実際の観測可能日数は非常に少ない。

現在は超小型探査機を用いて宇宙空間から月面衝突閃光の観測を行う EQUULEUS 計画 [3] や、日本-フランス間でリレー方式の観測を行い、継続観測時間の増加や将来の月震観測への応用を狙いとする SAKURA プログラム [4] が実施されている。また、NASA の MSFC[7] や ESA の NELIOTA[8] など、世界的にも月面衝突閃光の観測、研究が進められており、初観測からの約 20 年間で全世界での総観測数は 400 件以上あるが、月震研究への応用は進んでいない。

SAKURA プログラムでは月震研究の将来像として、月の地震計が 1 つだけでも月の構造把握ができることを目標としており、そのためには月面衝突閃光の多地点観測が重要となっている。多地点観測を現実的にするためには月面衝突閃光の観測に適した機材を把握する必要があるが、現状月面衝突閃光のスペクトルに関する情報は、本研究室卒業の、千、千田、八木澤卒業論文 [9][10][11] 内の計 5 件と非常に少ない。以上から、本研究ではこのプログラムの一環として、今後簡易的な望遠鏡でも効率的に観測ができ、月震に応用できるデータ数を増やせる環境を整えることを目的とし、月面衝突閃光のスペクトルを調べ、観測に適したカメラの感度特性を検討する。

2 観測

2.1 観測機材

観測は、口径 28 cm のシュミットカセグレン式望遠鏡 (図 1) に分光カメラ (図 2) を取り付けて行った。望遠鏡は本来焦点距離 2800 mm(F10) だが、レデューサーを使用し F3.3 とした。また、分光カメラは CCD カメラ (Grasshopper3、Pointgrey 社) と透過型ブレード回折格子 (70 本/mm、Edmund optics 社) から成る。



図 1 口径 28cm シュミットカセグレン式望遠鏡。赤道儀に天体自動導入コントローラ (Sky Sensor 2000、Vixen 社) を接続し、目標天体を自動追尾する。



図 2 分光カメラ。 CCD 上のカバーガラスに回折格子を接着している。

2.2 観測方法

観測は電気通信大学東 3 号館屋上で毎月月齢 3~8 の期間に行い、月の夜側 (地球照) を撮影した。録画には Fire Capture v2.5(フリーソフト)[12] を用い、ser 形式で動画を保存した。設定は、ビニングありの場合、階調 16 bit、Gain 2400(MAX)、Exp. 16 ms とし、ビニングなしの場合、階調 16 bit(ただし、有効なのは 14 bit)、Gain 2400(MAX)、Exp. 25 ms とした。また、月面衝突閃光候補を解析する際に比較に用いるため、30 分おきに録画を停止し、設定は変えずに月の付近にある 9 等前後の恒星 (比較星) を 100 フレーム撮影した。比較星については、天体シミュレーションソフトウェアステラナビゲータ 10(アストロアーツ社)[5] で位置を調べ、SIMBAD Astronomical Database[6] で等級とスペクトル型を調べた。観測終了時には望遠鏡に蓋をした状態 (ダーク) で観測時の設定ごとに 100 フレームずつ撮影した。

3 月面衝突閃光の検出・解析

3.1 検出方法

検出には本研究室で開発した ser_scan2 (図 3) [13] というソフトウェアを用いた。ser_scan2 は、録画データの中のあるフレーム、ある画素の明るさが前後のフレームと比較して予め設定した閾値よりも明るくなっているものを検出し、その画素に印をつけた bmp 画像を保存する。同時に、録画時の設定や検出位置などに関する情報を txt ファイルで保存する。検出をかける際には、動画内のタイムスタンプや宇宙空間、月の明るい部分など、検出範囲外にマスクをかけることができる。



図 3 ser_scan2。 検出をかけたい動画を選び、閾値や手動マスク範囲などを設定する。さらに、検出を開始、終了するフレーム番号や検出数上限、自動でマスクをかける青赤領域、画面全体の明度をそれぞれ設定し検出ボタンを押すと自動で検出作業を行う。

3.2 解析方法

前述の検出方法により検出された月面衝突閃光候補と比較星について、バックグラウンド、ダーク処理を施す。この操作には、本研究室で開発した、`ser_reduction`、`ser_average2`、`ser_average_and_reduction`、`ser_to_fits_csv`[13]を用いる。

比較星では星の像を挟んで上下の宇宙空間を平均しバックグラウンドとする。観測終了時に撮影したダークを `ser_average2` で平均し fits 画像へ変換する。比較星では、`ser_average_and_reduction` で比較星動画を平均し、ダーク処理を行い、星の 0 次像の最も明るい画素を中心として、上下 10 画素、左 10 画素、右 40 画素の範囲の結果を csv 形式で保存する。バックグラウンド処理については Excel 上で等高線グラフを用いて星と宇宙空間の境目を主観で判断し、バックグラウンドの各列の平均を求め星部分から減算する。

閃光候補については、検出のあったフレームとその前後 100 フレームを SER Player(フリーソフト)[14]で取り出し、閃光候補の前後を平均したものをバックグラウンドとして用いる。閃光候補は `ser_reduction` でダーク処理を行ったのち、`ser_average2` でバックグラウンドの平均 fits 画像と標準偏差の csv ファイルを作成する。このとき、ずらして平均にチェックを入れ、月の輪郭線を範囲選択し、基準フレームを検出のあったフレームとして平均処理をする。`ser_to_fits_csv` で検出フレームからバックグラウンドを差し引いた fits 画像を保存する。

処理の終わった月面衝突閃光と比較星については本研究室卒業の柿沼氏の論文 [15] に基づき、太陽の等級などのデータも用いて以下の手順で解析を行う。波長 λ については付録分光特性 A 参照。

まず、太陽光の分光フラックスを 5777 K (T_{\odot} 、太陽の有効温度) の黒体放射で近似し次のように表す。

$$F_{\odot}(\lambda) = g_{\odot} B_{T_{\odot}}(\lambda) \quad (1)$$

ここで $B_{T_{\odot}}(\lambda)$ は黒体の単位面積から単位波長あたりに放射されるフラックスであり、 g_{\odot} は太陽定数 $C_{\odot}(1.37 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2})$ を含む次式で決まる定数である。

$$g_{\odot} = \frac{C_{\odot}}{\sigma T_{\odot}^4} \quad (2)$$

星からの分光フラックスを温度 T_s の黒体放射で近似し、

$$F_s(\lambda) = g_s B_{T_s}(\lambda) \quad (3)$$

と表すと、ポグソンの式より次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} V_s - V_{\odot} &= -2.5 \log 10 \frac{\int_0^{\infty} F_s(\lambda) f_V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} F_{\odot}(\lambda) f_V(\lambda) d\lambda} \\ &= -2.5 \log 10 \frac{g_s \int_0^{\infty} B_{T_s}(\lambda) f_V(\lambda) d\lambda}{g_{\odot} \int_0^{\infty} B_{T_{\odot}}(\lambda) f_V(\lambda) d\lambda} \end{aligned} \quad (4)$$

星の V 等級と温度が分かれば (4) 式から、 g_s が決まり、(3) 式で表される星からの分光フラックスが分かる。星の温度に関しては、星が主系列星の場合、B 等級-V 等級の値を用いて $B - V = \frac{9600}{T_{eff}} - 1.00$ [16] に代入して求め、星が巨星の場合、V 等級-K 等級の値をもとに図 4 [17] から導く。

また、星の R 等級を次式で計算することもできる。

$$\begin{aligned} R_s - R_{\odot} &= -2.5 \log 10 \frac{\int_0^{\infty} F_s(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} F_{\odot}(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda} \\ &= -2.5 \log 10 \frac{g_s \int_0^{\infty} B_{T_s}(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda}{g_{\odot} \int_0^{\infty} B_{T_{\odot}}(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda} \end{aligned} \quad (5)$$

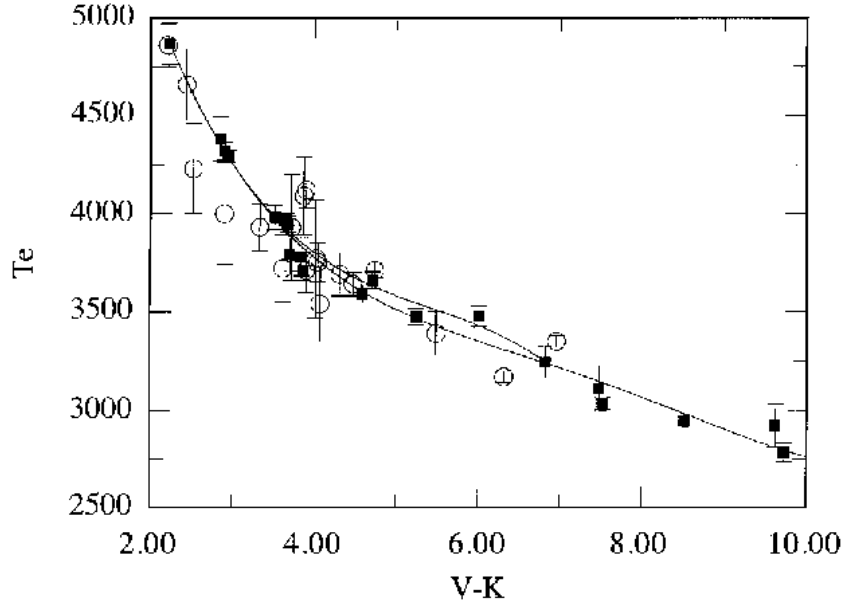


図4 巨星における V-K と温度の関係 [17]。 横軸は V-K の値、縦軸は温度を示す。白抜き丸は Ridgway et al.(1980) のえんぺい法によるデータ。黒い四角は Di Benedetto & Rabbia(1987)、Dyck et al.(1996)、Perrin et al.(1997) のマイケルソン干渉計によるデータ。

閃光のスペクトル (分光フラックス) は各波長での画像のカウント値を $N_f(\lambda)$ 、 $N_s(\lambda)$ とおくと、

$$F_f(\lambda) = F_s(\lambda) \frac{N_f(\lambda)}{N_s(\lambda)} \quad (6)$$

である。さらに、その R 等級は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} R_f - R_s &= -2.5 \log 10 \frac{\int_0^\infty F_f(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty F_s(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda} \\ &= -2.5 \log 10 \frac{\int_0^\infty F_f(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda}{g_s \int_0^\infty B_{T_s}(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

以上で、 C_\odot は太陽定数、 f_V 、 f_R は V バンド、R バンドの応答関数 [18]、 T 、 V 、 R は温度、V 等級、R 等級を表し、下付きの \odot 、 s 、 f はそれぞれ太陽、比較星、閃光を表す。太陽定数や太陽の温度、等級などは理科年表 [19] の値を用いた。

4 結果

複数個所で同時観測された閃光候補のうち、2018 年 4 月 21 日に宇宙科学研究所と同時観測されたもの 1 点と 2018 年 12 月 15 日 (ふたご座流星群) に日本大学と同時観測されたうちの 5 点について解析を行った。以下にその結果を示す。

4.1 4 月 21 日の閃光

図 5 は 2018 年 4 月 21 日 20:52:07 \pm 3 s に宇宙科学研究所で同時観測したものである。この閃光の解析では、比較星として時刻 20:36 に撮影した HIP32676 を用いた。



図 5 2018 年 4 月 21 日の閃光。 20:52:07 \pm 3 s(JST) に電気通信大学と宇宙科学研究所で同時観測。この時間の前後に月の周辺を通過する人工天体がないため月面衝突閃光と判断。

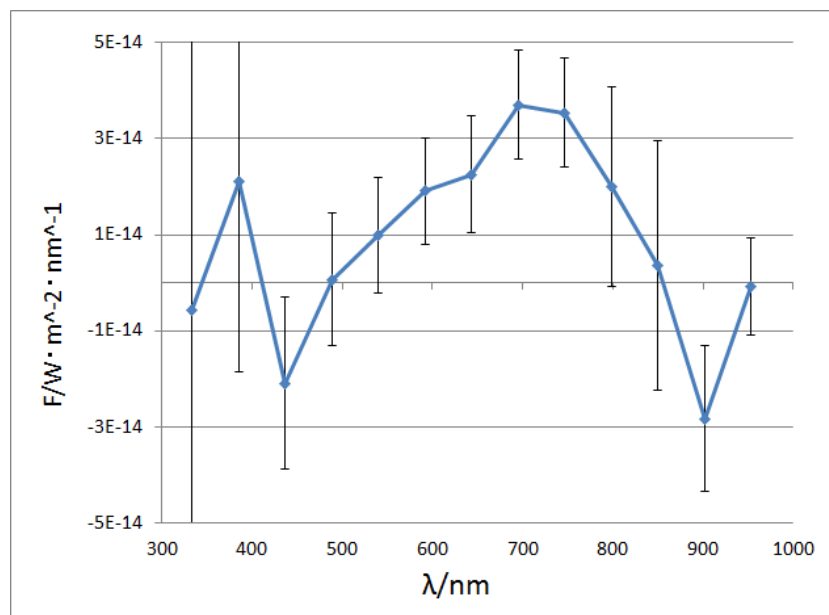


図6 4月21日の閃光スペクトル。横軸に波長 (nm)、縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$) を示す。

4.2 12月15日の閃光

12月15日は電気通信大学と日本大学の2地点でとらえられた閃光候補が13個あり、識別のため発光時刻の早いものからA、B、C...Mと番号をふつた。それを表1に示す。時刻は日本大学がPCの時計をネット上の時刻をもとに設定していたため、この値を最も正確であると仮定し決定した。 ± 1 sについては、各観測地点で発光確認された時刻から導いた。また、衝突位置は月面の2つのクレーター(グリマルディ、アリストアルコス)と発光位置を結んだ三角形と相似な図形ををVirtual Moon Atlas(フリーソフト)に描くことで導いた。我々の観測ではA、B、E、H、I、L、M閃光が検出された。C、D、F、J閃光は閃光自体が暗いものであったのか、観測は行っていたが検出されなかった。また、G、K閃光は発光時刻に星の撮影などで録画を停止していたため観測されなかった。

今回我々の観測で検出されたすべての閃光について解析を行った。各小々節の閃光スペクトルのグラフでは、カメラの特性や大気吸収を考慮し450 nm~800 nm付近を有効値として最小2乗法を用いて温度をフィッティングした。

表1 12月15日の閃光候補

閃光名	時刻 (JST)	衝突位置
A 閃光	17 : 17 : 06 \pm 1	39°W 21°S
B 閃光	17 : 29 : 33 \pm 1	57°W 30°N
C 閃光	17 : 58 : 48 \pm 1	40°W 30°N
D 閃光	18 : 09 : 46 \pm 1	50°W 5°S
E 閃光	18 : 44 : 04 \pm 1	49°W 26°N
F 閃光	18 : 46 : 15 \pm 1	70°W 5°N
G 閃光	19 : 23 : 06 \pm 1	35°W 15°S
H 閃光	19 : 25 : 41 \pm 1	71°W 60°S
I 閃光	19 : 28 : 45 \pm 1	48°W 12°S
J 閃光	19 : 35 : 55 \pm 1	50°W 30°N
K 閃光	19 : 54 : 33 \pm 1	55°W 25°N
L 閃光	20 : 22 : 11 \pm 1	74°W 3°S
M 閃光	20 : 35 : 51 \pm 1	29°W 23°N

4.2.1 A 閃光

A 閃光は 17:17:07.399(JST) の 1 フレームに写っていた明るい閃光である (図 7)。月面上の衝突位置は 39°W 、 21°S 、付近には Gassendi Y クレーターが存在する。比較星は時刻 17:08 に観測した HIP116428 である。



図 7 A 閃光。 1 フレーム目の様子。閃光部分が囲まれている。

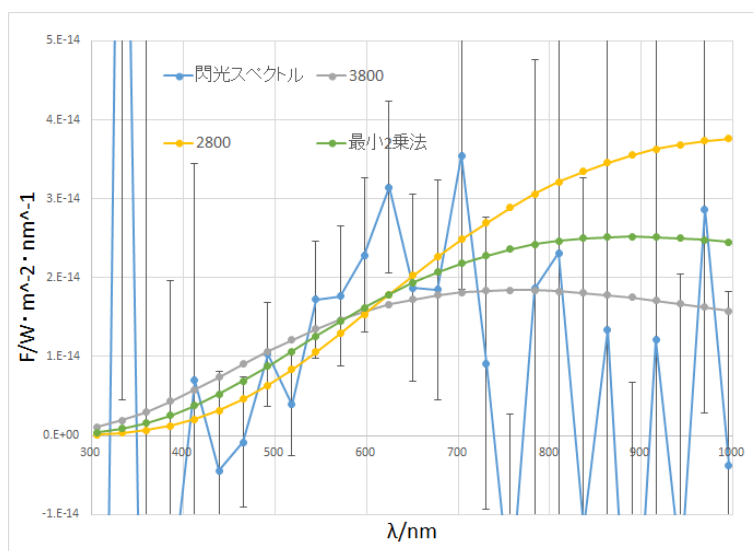


図 8 A 閃光の閃光スペクトル。 縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450 ~800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 3264 K。

4.2.2 B 閃光

B 閃光は 17:29:33±1 s(JST) から 3 フレームにわたり写っていた (図 9)。明るい閃光で、月面上の衝突位置は $57\pm1^\circ\text{W}$ 、 $30\pm1^\circ\text{N}$ 、付近には Dorsa Whiston クレーターが存在する。比較星は時刻 17:42 に観測した HIP116428 である。

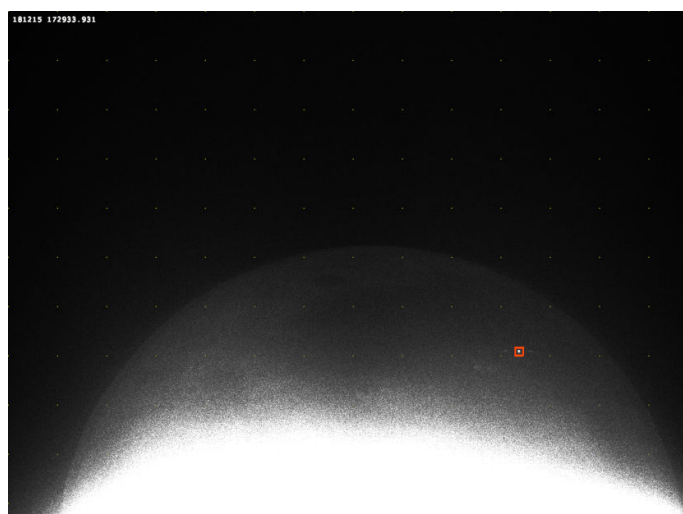


図 9 B 閃光。 1 フレーム目の様子。閃光部分が囲まれている。

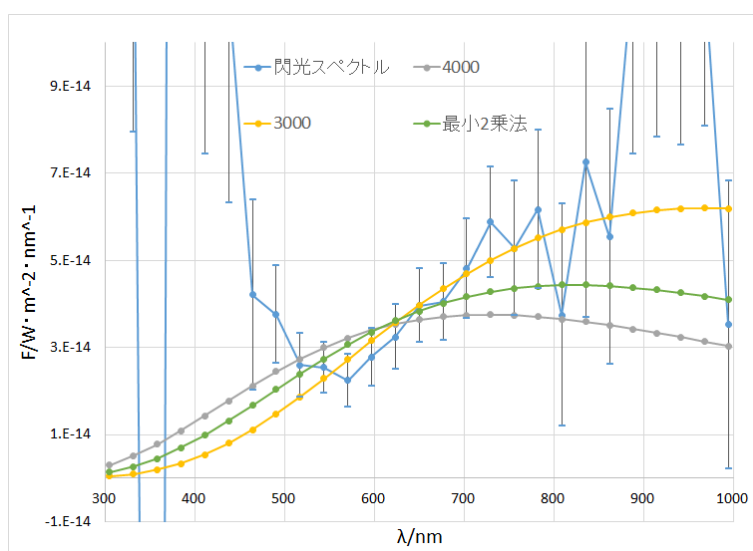


図 10 B 閃光 1 フレーム目の閃光スペクトル。 縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 3532 K。

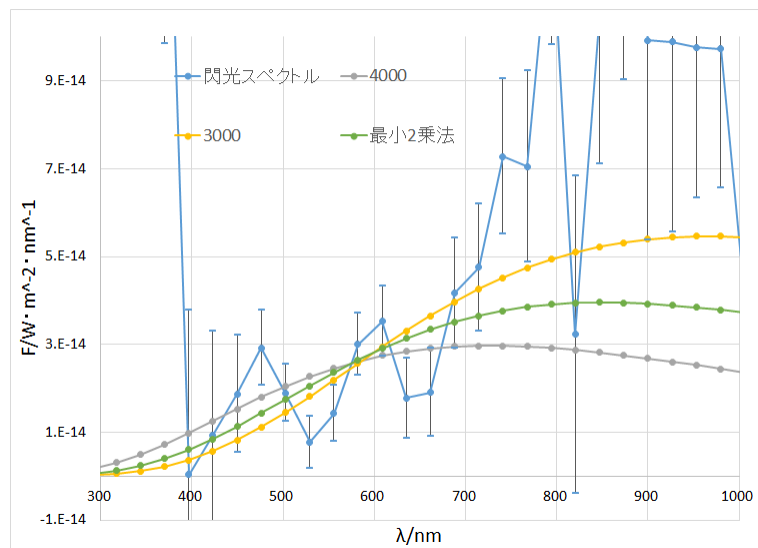


図 11 B 閃光 2 フレーム目の閃光スペクトル。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 3409 K。

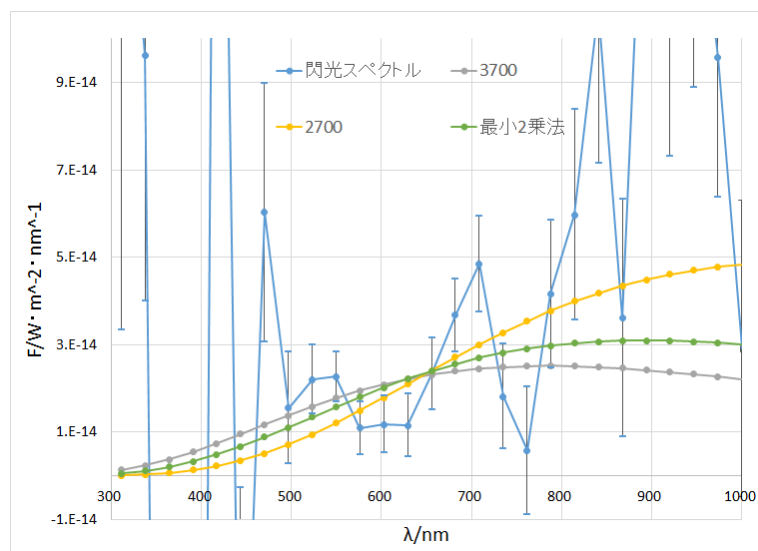


図 12 B 閃光 3 フレーム目の閃光スペクトル。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 3258 K。

4.2.3 E 閃光

E 閃光は 18:44:04.486(JST) の 1 フレームに写っていたやや暗い閃光で、画面上では 1 次像は見えない (図 13)。衝突位置は $49\pm 1^\circ\text{W}$ 、 $26\pm 1^\circ\text{N}$ 、付近には De Gasparis F クレーターが存在する。比較星は同視野内にあった GSC5829.354 を用いた。



図 13 E 閃光。 1 フレーム目の様子。閃光部分が囲まれている。比較星は月の左上。

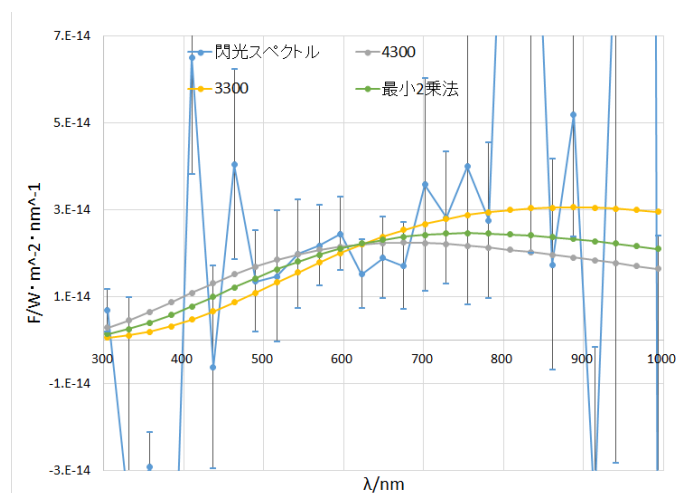


図 14 E 閃光の閃光スペクトル。 縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450 ~ 800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 3823 K。

4.2.4 H 閃光

H 閃光は 19:25:41 \pm 1 s(JST) から 4 フレーム写っていた (図 15)。非常に明るく、0 次像に 1 部飽和している箇所があった。衝突位置は 71 \pm 1°W、60 \pm 1°S、月の輪郭線上でとらえられた。付近のクレーターは Pingre F、比較星は時刻 19:51 に観測した HIP116834 を用いた。

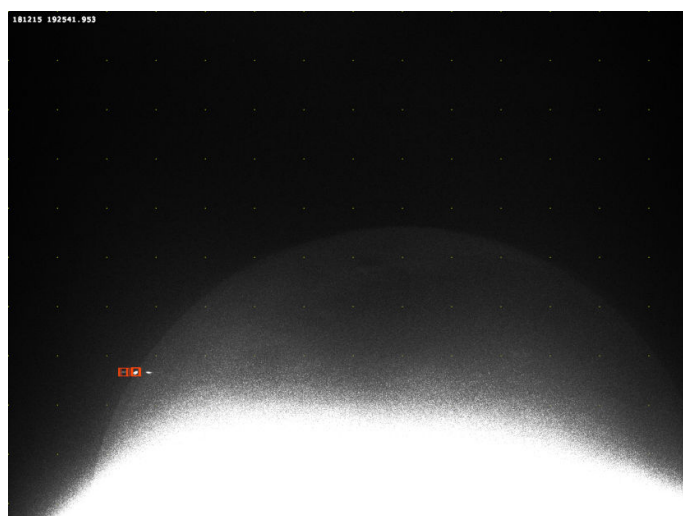


図 15 H 閃光。 1 フレーム目の様子。閃光部分が囲まれている。

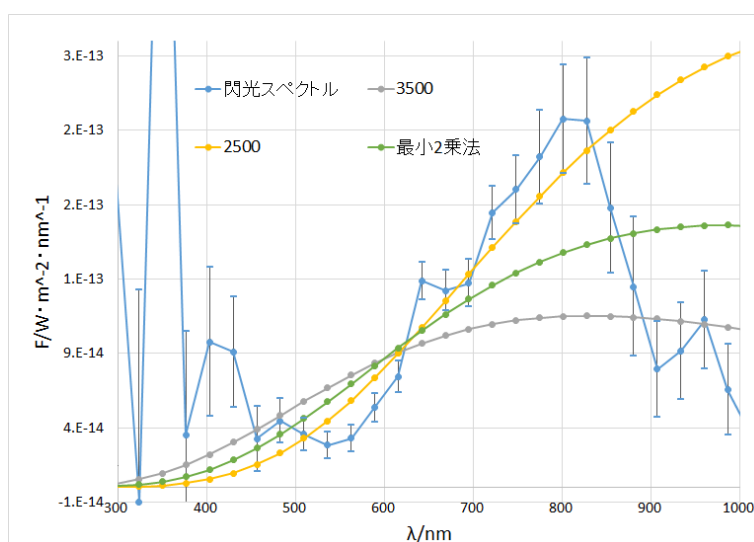


図 16 H 閃光 1 フレーム目の閃光スペクトル。 縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450~800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 2952 K。

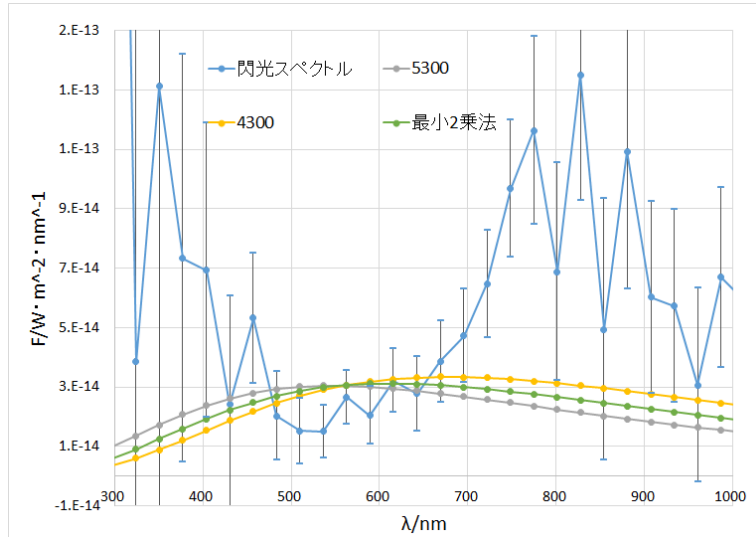


図 17 H 閃光 2 フレーム目の閃光スペクトル。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 4751 K。

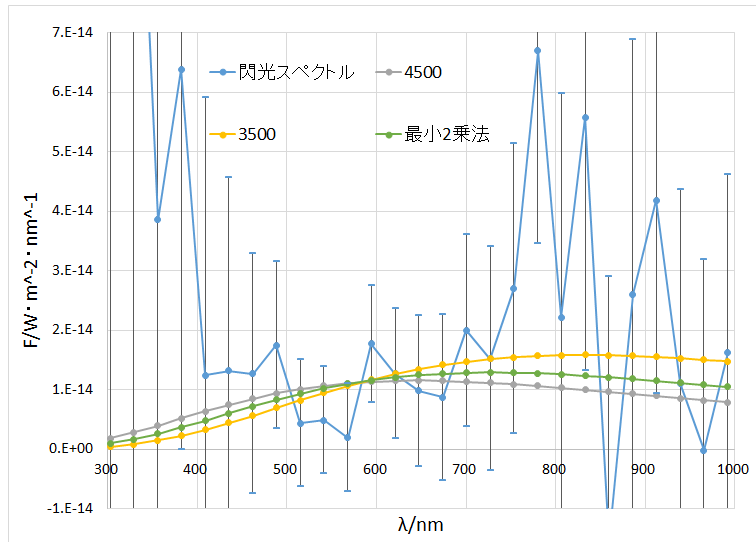


図 18 H 閃光 3 フレーム目の閃光スペクトル。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 3998 K。

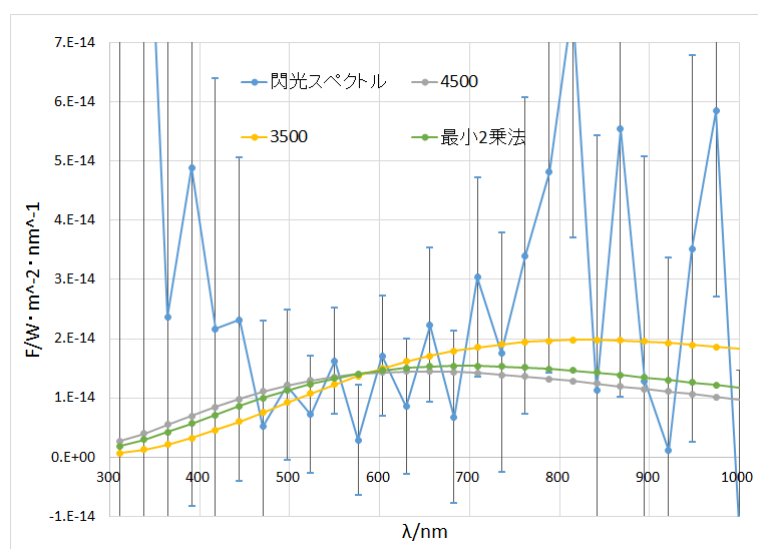


図 19 H 閃光 4 フレーム目の閃光スペクトル。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 4162 K。

4.2.5 I 閃光

I 閃光は 19:28:45 \pm 1 s(JST) から 2 フレーム写っていた (図 20)。明るい閃光で、衝突位置は 48 \pm 1°W、12 \pm 1°S、付近には Billy B クレーターが存在する。比較星は H 閃光と同じ HIP116834 を用いた。

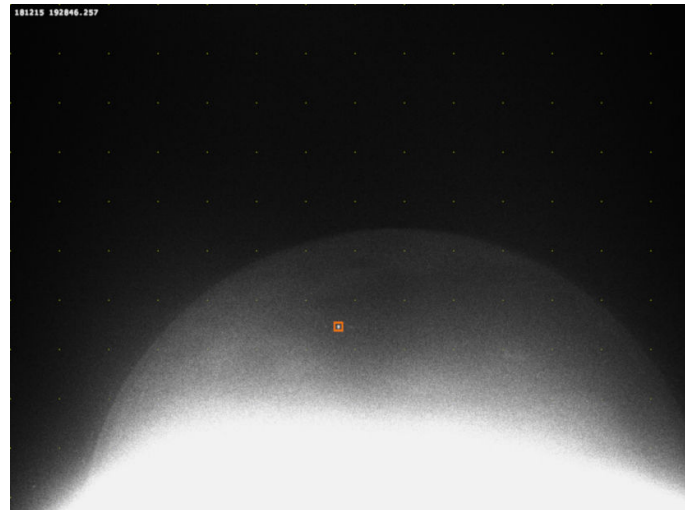


図 20 I 閃光。 1 フレーム目の様子。閃光部分が囲まれている。

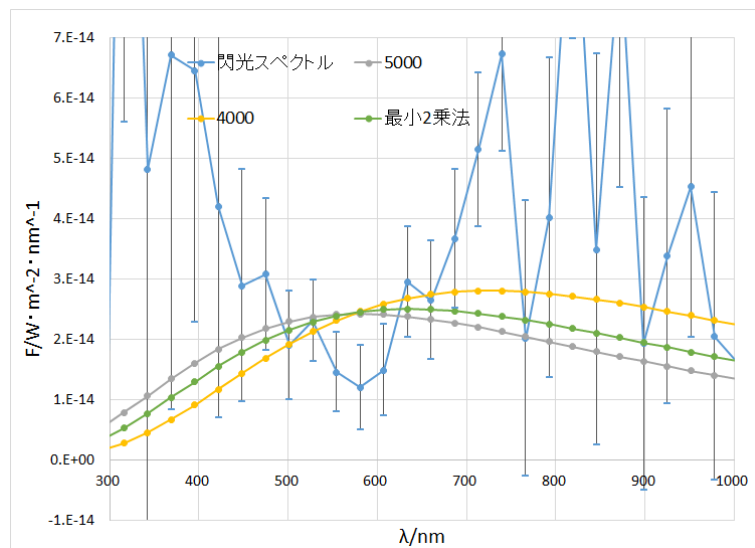


図 21 I 閃光 1 フレーム目の閃光スペクトル。 縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450~800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 4558 K。

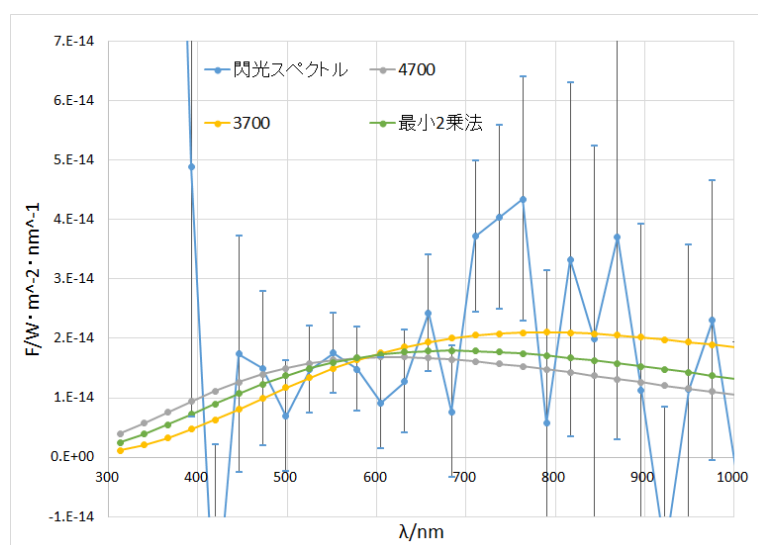


図 22 I 閃光 2 フレーム目の閃光スペクトル。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 4248 K。

4.2.6 L 閃光

L 閃光は 20:22:12.654(JST) に 1 フレーム写っていた明るい閃光である。月面上の衝突位置は 74°W、3°S、付近には Riccioli クレーターが存在する。比較星は H 閃光と同じ HIP116834 を用いた。



図 23 L 閃光。 1 フレーム目の様子。閃光部分が囲まれている。

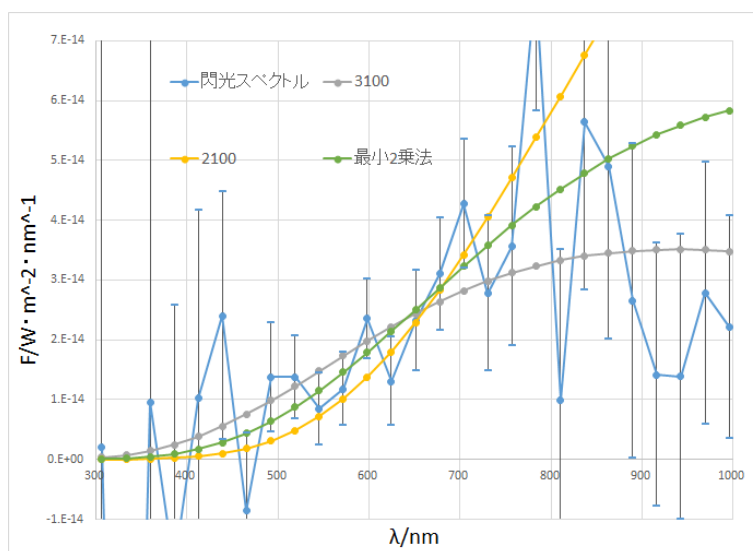


図 24 L 閃光の閃光スペクトル。 縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450 ~800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 2582 K。

4.2.7 M 閃光

M 閃光は 20:35:51.015(JST) に 1 フレーム写っていた暗い閃光で、1 次像もほぼ見えない (図 25)。月面上の衝突位置は $29 \pm 1^\circ \text{W}$ 、 $23 \pm 1^\circ \text{N}$ 、付近には Euler クレーターが存在する。比較星は時刻 20:53 に観測した HIP117052 を用いた。

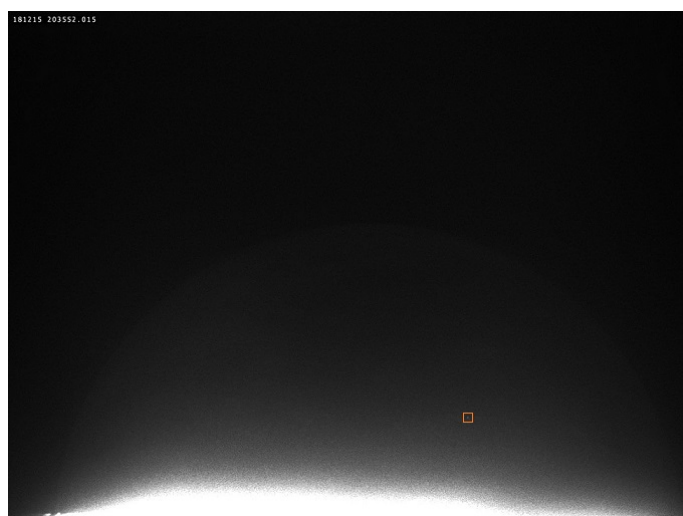


図 25 M 閃光。 1 フレーム目の様子。閃光部分が囲まれている。

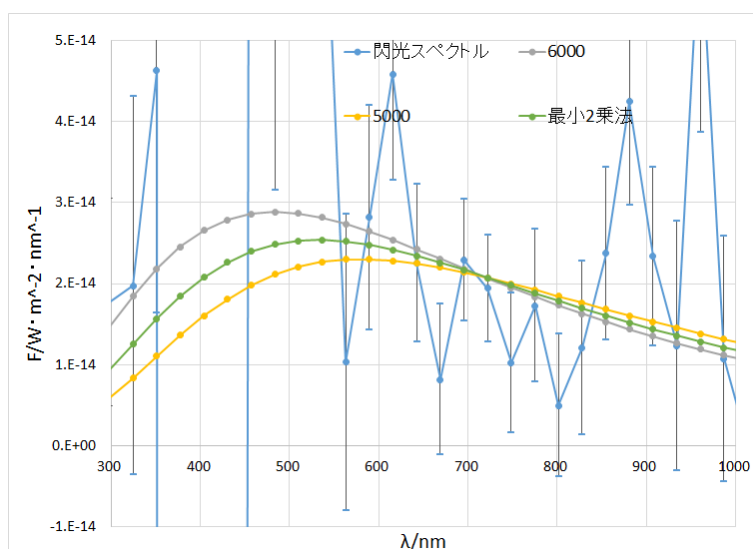


図 26 M 閃光の閃光スペクトル。 縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450 ~800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 5464 K。

5 考察

5.1 4月21日の閃光

図6に対し、適当な温度での黒体放射との近似を試みたが、この閃光はいかなる温度の黒体放射とも近似できないことがわかった。この結果に関しては、グラフの900nm付近で大きく閃光スペクトルが下がっていることから、水蒸気による吸収が考えられ、正確なスペクトルが求められていない可能性がある。しかし、もしこのグラフが正確であるとする、これまで月面衝突閃光は黒体放射と考えられてきたがそれ以外の場合を考慮して観測、解析を行わなければならない。また、この閃光について前述の解析方法に従いR等級を求めたところ、 $R = 7.13 \pm 0.32$ であった。今回比較に用いた星はHIP32676である。さらに宇宙科学研究所で取得された閃光について、HIP32676とは別の比較星HD265098を用いて(5)式から閃光のR等級を求めたところ、7.23等級という結果が得られた。以上より、4月21日に検出された閃光の等級は7等級程度であることがわかった。

5.2 12月15日の閃光

5.2.1 A 閃光

図 8 より、A 閃光は 700 nm 以降でグラフの落ち込みが激しく、誤差範囲も大きくなっていることがわかる。このときの V、R 等級はそれぞれ、 8.45 ± 0.85 、 7.40 ± 0.88 、黒体放射で近似した温度は 3264 K であった。誤差範囲が大きくなってしまった原因としては、比較星が月のそばにあったためバックグラウンドの値が通常の宇宙空間よりも高く、標準偏差も大きくなってしまったこと、比較星の 0 次像が数画素にわたり飽和していたため、正確なカウント値が得られなかったことが考えられる。また、風の影響が比較星撮影時 100 フレームの間に像が動いていたことも画像を平均する際に影響してしまった可能性がある。

5.2.2 B 閃光

図 10～図 12 より、B 閃光では時間経過による変化はあまり見られないことがわかる。発光時の温度も 3528 K から 3260 K まで 268 K(約 8%) と変化量は非常に小さい。また、以下の表 2 では B 閃光のフレームごとの温度と V、R 等級を示す。

表 2 B 閃光の等級

	1 フレーム目	2 フレーム目	3 フレーム目
温度 K	3528	3409	3260
V 等級	7.79 ± 0.33	8.23 ± 0.51	8.21 ± 0.56
R 等級	6.68 ± 0.31	6.71 ± 0.41	7.29 ± 0.57

表 2 より、等級の変化量も温度の変化量とほぼ等しく、大きな変化はなかった。R 等級が V 等級よりも明るいことから、この閃光は赤い光が強いということが等級からもわかる。

この B 閃光に関しては電気通信大学栗原誠弥氏が、別の望遠鏡、分光カメラで同時観測し、同様の解析方法で解析を行っている [20]。栗原氏の 1 フレーム目から 3 フレーム目までのグラフを以下の図 27～29 に示す。なお、この解析では比較星に TYC5829-1158-1 を用いている。これらのグラフを

図 10～12 と比較すると、温度に差はみられるもののグラフが有効範囲内で右肩上がりになっていること、この傾向は時間経過によって変化しないことが共通している。温度に関しては各フレーム 1000 K 程ずれがあるが、これは比較星が異なることが起因していると考えられる。また、こちらの結果では栗原氏のグラフよりエラーバーが大きく、500 nm 以下で乱れているため最小 2 乗法でのフィッティングがうまく一致しなかったことも温度のずれに関与していると考えられる。

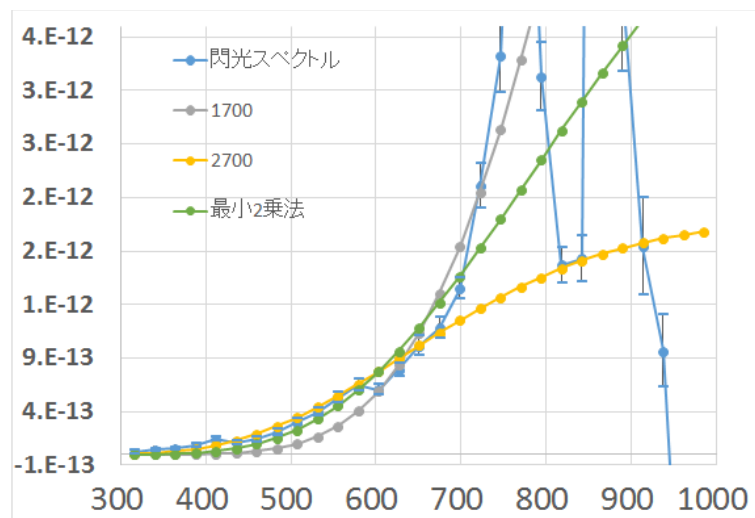


図 27 B 閃光 1 フレーム目の閃光スペクトル (栗原誠弥氏解析 [20])。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W/m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 2174 K。

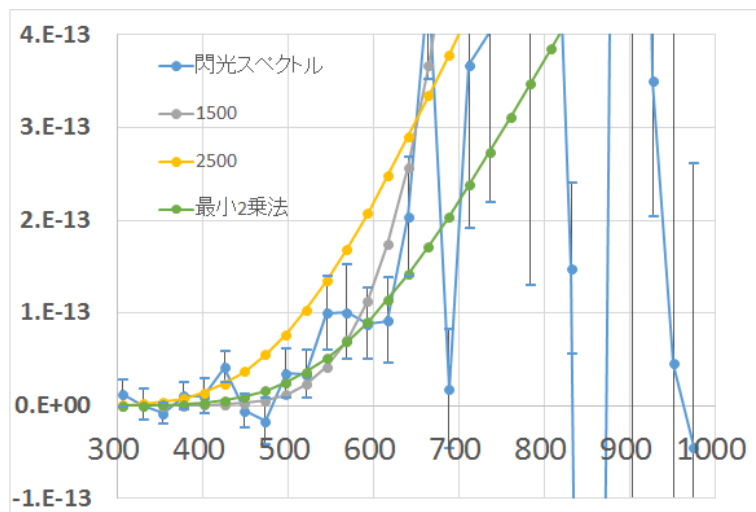


図 28 B 閃光 2 フレーム目の閃光スペクトル (栗原誠弥氏解析 [20])。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450~800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 2158 K。

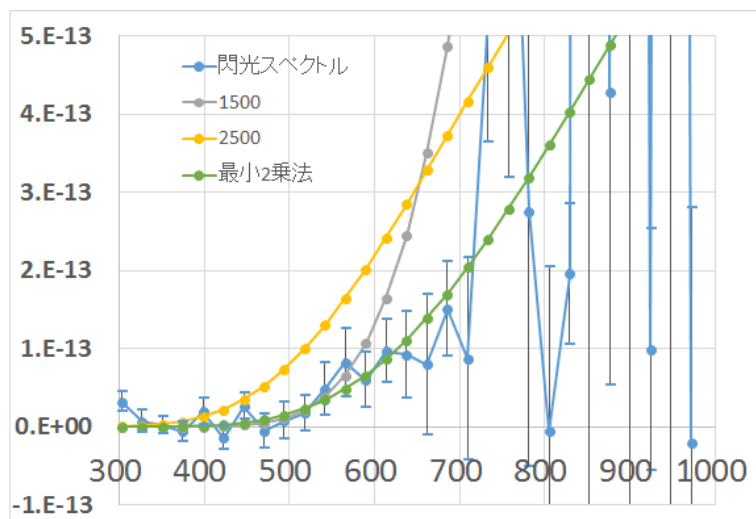


図 29 B 閃光 3 フレーム目の閃光スペクトル (栗原誠弥氏解析 [20])。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450~800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 2008 K。

5.2.3 E 閃光

図 14 より、E 閃光は有効値の範囲内で最小 2 乗法のグラフとおよそ一致しており、発光時の温度は 3823 K でほぼ間違いないと考えられる。このときの V、R 等級はそれぞれ、 8.17 ± 1.07 、 7.08 ± 0.82 であった。等級の誤差が大きい原因は E 閃光が暗い閃光であったことと 1 次像がほぼ見えなかったことが考えられる。

5.2.4 H 閃光

図 16～図 19 から、波形が時間とともに大きく変化していることがわかる。また、温度を見ると、1 フレーム目の 2952 K に対し、2～4 フレーム目が 1000 K 以上も高くなっていることがわかる。これについては図 30 の x 座標 290～292 の範囲からわかるように、1 フレーム目の 0 次像が飽和していたことにより正確な合計カウント値が得られないことや、0 次像の重心が不明確で波長にずれが生じている可能性があることが関係していると考えられる。さらに、月の輪郭線上に閃光があったため、バックグラウンド処理を施していても、0 次像の広がりの一部にカウント値が不正確な箇所が存在している可能性も考えられる。次の表 3 では H 閃光の温度と等級の変化を示す。

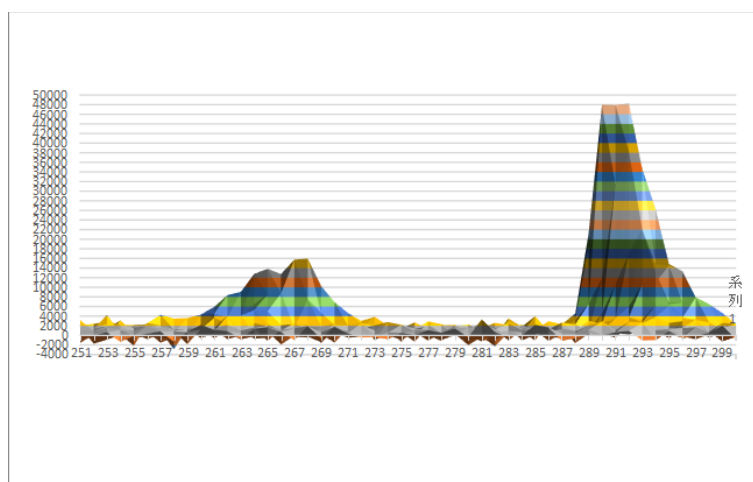


図 30 H 閃光のカウント値。縦軸にカウント値、横軸に x 座標を示す。1 次処理およびバックグラウンド処理済み。右の山が 0 次像、左の山が 1 次像。

表 3 H 閃光の等級

	1 フレーム目	2 フレーム目	3 フレーム目	4 フレーム目
温度 K	2952	4751	3998	4162
V 等級	7.31 ± 0.29	8.08 ± 0.74	9.27 ± 3.45	8.80 ± 3.24
R 等級	5.45 ± 0.14	6.56 ± 0.45	7.66 ± 2.85	7.57 ± 2.16

表 3 を見る限り、等級においては減衰の様子に特異な点は見られない。ただし、こちらにも画素が飽和していたことを考えると 1 フレーム目の等級はさらに明るくなっている可能性もあるため、一概に問題がないとは言えない。この結果を正しいと仮定するならば、V 等級と比較して R 等級が最大で 1.86 等級も明るくなっていることがわかり、非常に赤い発光であったと考えられる。

5.2.5 I 閃光

図 21 では、580 nm 付近を谷としてグラフが曲線を描いているように見え、黒体放射の各温度のスペクトルとは一致していないように感じる。しかし、図 22 では他の閃光スペクトルのグラフと同様におおよそ一致しているように見える。このときの等級は次の表 4 に示す。

表 4 I 閃光の等級

	1 フレーム目	2 フレーム目
温度 K	4558	4248
V 等級	8.21 ± 0.56	8.50 ± 0.83
R 等級	6.97 ± 0.51	7.45 ± 0.94

表 4 では、1 フレーム目と 2 フレーム目を比較しても他の閃光と同様の減衰を示しており、1 フレーム目も異常はないと考えられる。図 21 のグラフは 580 nm 付近で沈んでいるためか、V 等級は他の閃光の V 等級よりも若干暗くなっている。

この閃光に関しては電気通信大学栗原誠弥氏が、別の望遠鏡、分光カメラで同時観測し、同様の解析方法で解析を行っている [20]。栗原氏の 1 フレーム目から 3 フレーム目までのグラフを以下の図 31～33 に示す。なお、この解析においては比較星に TYC5829-354-1 を用いている。栗原氏の観測では

I 閃光は 3 フレームにわたって検出された。これらのグラフと図 21、22 を比較すると、図 21 で見られたような 580 nm 付近での落ち込みは見られないが、有効範囲内で右肩上がりになっているのは共通している。ただし、温度に関しては大きくずれがあることがわかる。これに関して、図 21 の 500 nm 以下における誤差範囲の大きさを考慮し、有効範囲を 500～800 nm とし、再度計算をおこなった。その結果を図 34,35 に示す。有効範囲を再設定した結果、最小 2 乗法での温度が 2524、3050 K と栗原氏の結果に近い値を示した。以上から I 閃光は温度 2500～3000 K 程度の赤色発光であったといえる。

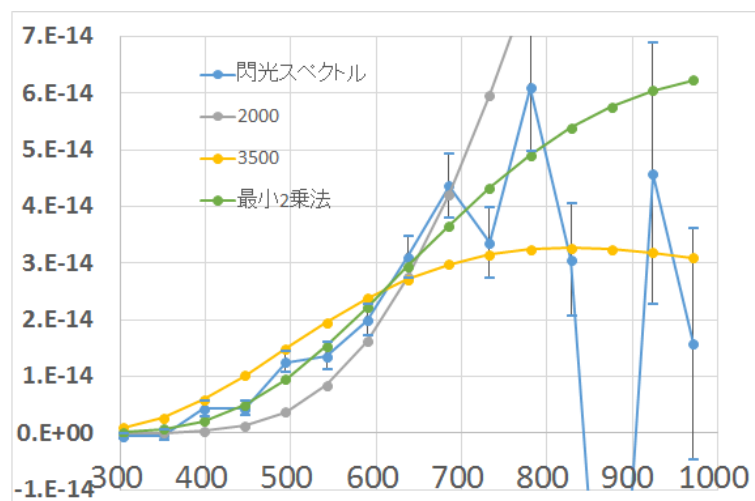


図 31 I 閃光 1 フレーム目の閃光スペクトル (栗原誠弥氏解析 [20])。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 2729 K。

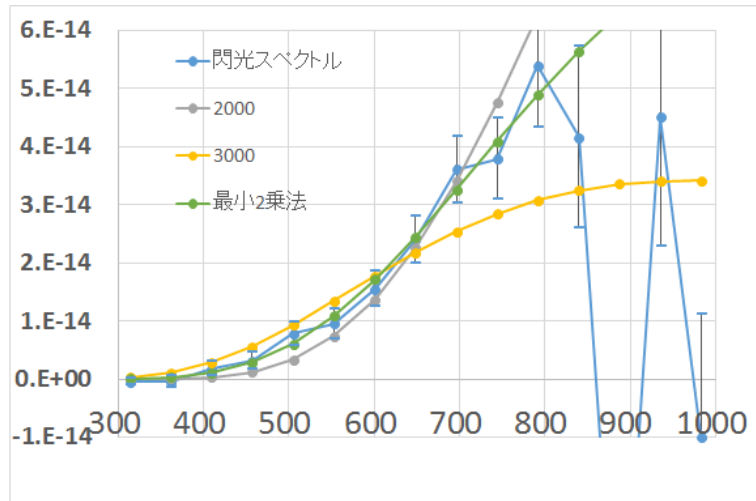


図 32 I 閃光 2 フレーム目の閃光スペクトル (栗原誠弥氏解析 [20])。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450~800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 2384 K。

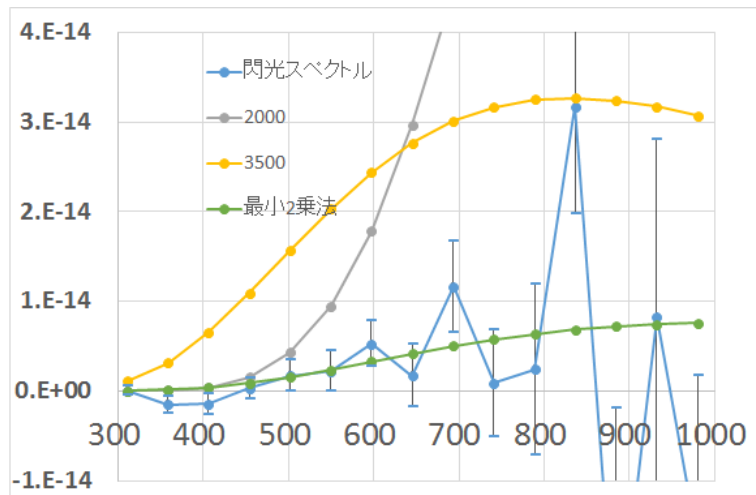


図 33 I 閃光 3 フレーム目の閃光スペクトル (栗原誠弥氏解析 [20])。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。450~800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 2850 K。

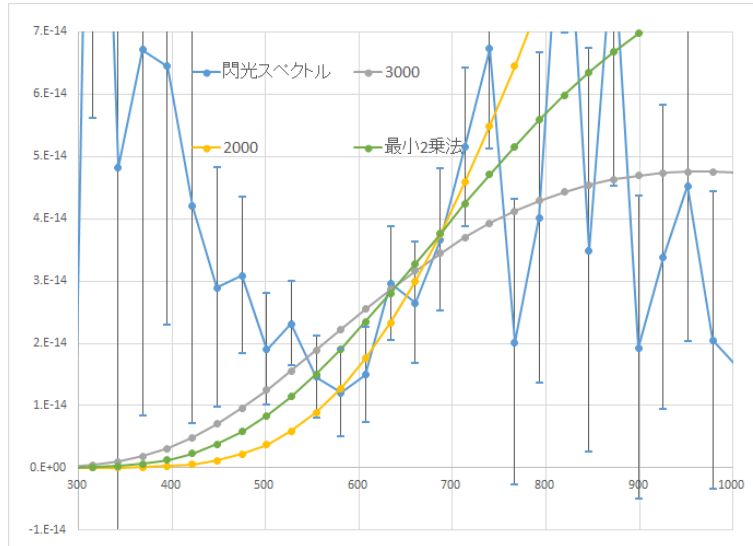


図 34 I 閃光 1 フレーム目の閃光スペクトル。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。500～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 2524 K。

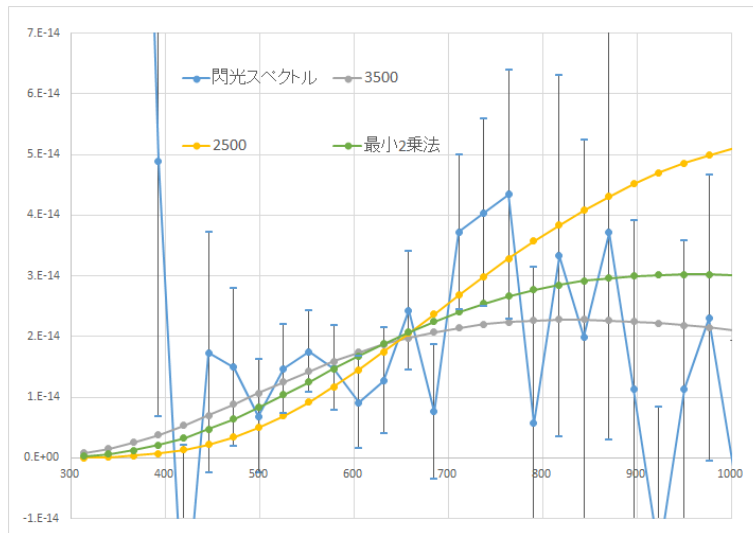


図 35 I 閃光 2 フレーム目の閃光スペクトル。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。500～800 nm の範囲で最小 2 乗法で求めた発光の温度は 3050 K。

5.2.6 L 閃光

図 24 より、L 閃光は有効範囲内で最小 2 乗法のグラフとおよそ一致しており、黒体放射を仮定すると発光時の温度は 2582 K である考えられる。このときの V、R 等級はそれぞれ、 8.55 ± 0.77 、 7.11 ± 0.51 であった。黒体放射のグラフや R 等級が V 等級よりも明るいことを踏まえると、L 閃光は赤色の発光をしていたと考えられる。

5.2.7 M 閃光

M 閃光は図 26 からわかるように、他閃光のグラフよりも波長の短い 450 nm～600 nm 付近で閃光スペクトルが大きな値を示している。M 閃光の V、R 等級はそれぞれ、 6.97 ± 0.49 、 7.26 ± 0.70 であり、本論文内で唯一 R 等級が V 等級よりも暗くなっており、M 閃光は青い光を発していたと考えられる。しかし、等級はこと座のベガ (9600 K) を基準とし、それよりも温度の低い黒体放射はすべて R 等級の方が明るい赤い発光となるはずである。このことから、M 閃光は月面衝突閃光ではない可能性がある。ただし、M 閃光は暗い閃光であったこと、月の明るい側に近かったことから、バックグラウンドの処理を行っていても周辺光の影響があったことも考えられる。

この閃光に関しては電気通信大学南部幹也氏が別の望遠鏡、分光カメラで同時観測し、同様の解析方法で解析を行っている [21]。以下の図 36 にその結果を示す。図 36 では図 26 同様にグラフが右肩下がりになっている。南部氏の結果では閃光の有効範囲を 500～900 nm として黒体放射での近似を行い、その時の有効温度は 10501 K であった。この有効範囲を 450～800 nm に再設定し黒体放射で近似を行うと 8483 K となった。有効範囲の条件を揃えたうえで、なお温度に大きく差が出ている原因としては、比較に用いた星が異なっていること、観測時の設定の違い、エラーバーの範囲などが考えられる。まず、南部氏が解析に用いた星は TYC6331-1718-1、M 型の巨星であるのに対し、こちらでは G 型主系列星を用いていた。巨星と主系列星では温度の求め方も異なるため差が生じる。次に、南部氏の観測では M 閃光観測時にビニングをしていたため光の情報がこちらと比較して少ないことも、スペクトルに黒体放射を近似するうえで影響を与えていた可能性がある。そ

して、こちらの解析では閃光スペクトルのエラーバーの範囲が大きく、近似の精度が低いことが考えられる。

また、南部氏の論文によると、M 閃光は像が左下から右上に向かって少し伸びているように見える。ずれはあるもののどちらの論文でも他の閃光と比較して温度が高いことやスペクトルの形が異なること、1 フレームの間に動きが見えることから、M 閃光は人工天体の反射によるものである可能性が高いと考えられる。

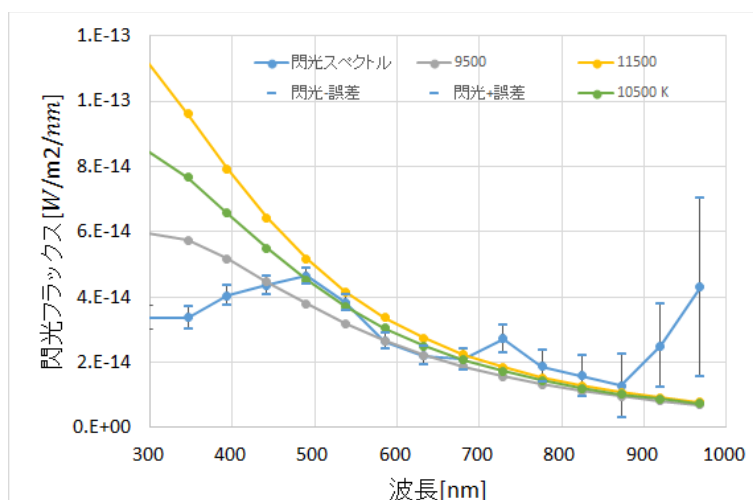


図 36 M 閃光の閃光スペクトル (南部幹也氏解析)[21]。縦軸に閃光スペクトル ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$)、横軸に波長 (nm) を示す。比較星は TYC6331-1718-1。最小 2 乗法の範囲は 500~900 nm、その時の温度は 10501 K。

6 まとめ

本論文では 2018 年 4 月 21 日と 2018 年 12 月 15 日に、複数の観測地点で同時観測した月面衝突閃光について解析を行った。その結果、4 月 21 日の閃光は黒体放射では近似できないことがわかった。原因としては、大気中の水蒸気によって光が吸収され、長波長側のスペクトルが不正確であった可能性が考えられる。しかし、今回の結果から黒体放射以外の発光による月面衝突閃光が存在する可能性も考慮する必要があるといえる。また、12 月 15 日の閃光はすべて黒体放射で近似でき、1 つを除いて閃光スペクトルは 700 nm 以降にピークを持つことがわかった。等級においても 1 つを除き、R 等級が V 等級よりも高い値であった。これらは複数フレームにわたって写った月面衝突閃光においても同様であり、時間経過による変化はないとわかった。また、月面衝突閃光が黒体放射であると仮定するならば、今回得られた各閃光温度は約 2500～4000 K となり、その時のピーク波長は約 700～1100 nm であるとわかる。以上から、一般に月面衝突閃光は 700～1100 nm 付近にピークを持つと考えられるため、観測には 700～1100 nm に高い感度をもつカメラが適しているといえる。

参考文献

- [1] 小野寺圭祐, Constraint on Impact-Seismic Efficiency from the Apollo Lunar Seismic Data Analysis and Numerical Simulation, 総合研究大学院大学 平成 30 年度修士論文.
- [2] Cudnik, B., Lunar Meteoroid Impacts and How to Observe Them, Astronomers' Observing Guides, Springer, 2009, DOI10.1007/978-1-4419-0324-2_2.
- [3] 宇宙科学研究所 地球一月ラグランジュ点探査機 EQUULEUS による深宇宙探査 CubeSat 実現への挑戦 <<http://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/171020.html>> (2019 年 1 月 29 日現在).
- [4] 日本学術振興会 二国間交流事業 共同研究セミナー <<https://www.jsps.go.jp/j-bilat/semina/jrss.html>> (2019 年 1 月 29 日現在).
- [5] アストロアーツ 天体シミュレーションソフトウェア ステラナビゲータ 10 <<https://www.astroarts.co.jp/products/stlnav10/index-j.shtml>> (2019 年 1 月 29 日現在).
- [6] SIMBAD Astronomical Database <<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>> (2019 年 1 月 29 日現在).
- [7] R.M. Suggs, The Flux of Kilogram-sized Meteoroids from Lunar Impact Monitoring, Icarus, 2014.238:23-36.
- [8] ESA Lunar Impact Events <<https://neliota.astro.noa.gr/>> (2019 年 1 月 29 日現在).
- [9] 千裕亮, 月面閃光の超低分散スペクトル I, 電気通信大学 平成 29 年度卒業論文.
- [10] 千田秀斗, 月面閃光の超低分散スペクトル II, 電気通信大学 平成 29 年度卒業論文.
- [11] 八木澤航平, 月面閃光の超低分散スペクトル III, 電気通信大学 平成 29 年度卒業論文.

- [12] Fire Capture ホームページ <<http://www.firecapture.de/>> (2019 年 1 月 12 日現在) .
- [13] 柳澤研究室ホームページ 月面衝突閃光 (地上観測) 解析方法 解析ソフト <<http://www.yanagi.cei.uec.ac.jp/luna/analyses.html>> (2019 年 1 月 13 日現在) .
- [14] SER Player ホームページ <<https://sites.google.com/site/astropipp/ser-player>> (2019 年 1 月 13 日現在) .
- [15] 柿沼文広, 月面衝突閃光観測用スペクトルカメラ, 電気通信大学大学院 平成 28 年度修士論文.
- [16] 吉岡一男, 『天文物理学入門』 財団法人放送大学教育振興会 p.132-133.
- [17] Bessel, M.S., Model atmospheres broad-band colors, bolometric corrections and temperature calibrations for O - M stars, *Astronomy and Astrophysics*, *Astron. Astrophys.* 1998.333:231-250.
- [18] Bessel, M.S., Standard photometric systems, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2005.43:293-336.
- [19] 『理科年表 平成 25 年』 国立天文台編 丸善出版 p.96.
- [20] 栗原誠弥, 月面衝突閃光の低分散スペクトル II, 電気通信大学大学院 平成 30 年度修士論文.
- [21] 南部幹也, 月面閃光の低分散スペクトル③, 電気通信大学 平成 30 年度卒業論文.

謝辞

本論文執筆にあたり、主任指導教員である柳澤正久教授には、観測や解析など丁寧にご指導いただきました。また、研究活動外においても様々な相談に親身に乗っていただきました。誠にありがとうございました。

研究室メンバーにも、観測協力や研究に関する相談など多くの場面で助けていただきました。ありがとうございました。

そして、共同研究において様々な意見交換や資料提供をしていただいた、宇宙科学研究所、総合研究大学院大学の小野寺さん、SAKURA プログラムで国内だけでなくフランスなど国外に対しても密に連絡を取ってくださった日本大学の阿部先生、会津大学の山田先生、リレー観測に協力してくださった各国の皆様へ、ここで感謝申し上げます。2年間ありがとうございました。

7 付録

分光特性

月面衝突閃光の解析をするために、観測機材の分光特性を調べる。ただし以下の実験 A～C では分光カメラに焦点距離 55 mm のレンズを取り付け、絞りを実際に観測に用いた望遠鏡と同じ F3.3 に設定した状態で感度特性を調べる。また、実験 D では分光カメラを望遠鏡に取り付けた状態で星 TYC1735-927-1 を撮像して特性を調べた。

A 分光特性評価実験 A

A.1 実験方法

この実験では、波長と 0 次-1 次像間の重心距離の関係を調べる。光源とモノクロメータを光ファイバーで繋ぎ、モノクロメータで波長を 400 nm から 800 nm まで 50 nm ずつ変え、その光を光ファイバーで点光源にして分光カメラで 100 フレーム撮影する (図 A1)。像は視野の中心に来るようにし、波長を変更する度にゲインやフォーカス、露光時間を調節する。ビニングはせず、階調を 16 bit に固定。また、各設定でカメラにキャップをした状態 (ダーク) も 100 フレーム撮影する。実験 A ではムラ補正のため、白い画面を 100 フレーム撮影し平均したものをフラットとして 1 次処理に用いる。

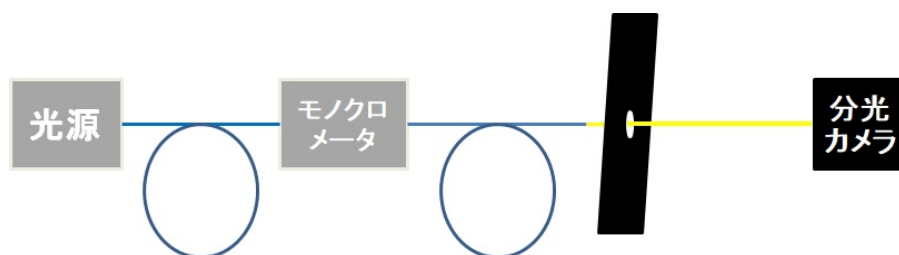


図 A1 実験 A、B の様子。 3100 K の光源とモノクロメータを光ファイバーで繋ぎ、モノクロメータからの光はコア径 50 μm の光ファイバーで送る。ファイバーとカメラの間には、外部光を遮るためにスリットの入った黒い板を挟んだ。

A.2 解析方法

解析には本研究室で開発した解析用ソフトウェア `ser_average_and_reduction`[13] で 100 フレームを平均しダークとフラットの fits 画像を準備する。これを用いて 1 次処理を施す。バックグラウンドの補正をした後 csv 形式で保存し、0 次像と 1 次像の明るさの重心座標 (単位は画素) を求める。

A.3 結果

図 A2 に像の一部を示す。上から 400 nm、450 nm、と 50 nm ずつ波長が長くなっている。中心の像が 0 次像、その右に 1 次像、2 次像、0 次像の左に -1 次像、-2 次像と広がっている。右側の色は波長の目安 (イメージ) である。また、0 次像の重心と 1 次像の重心の間の距離を画素数で表したとき、波長と距離の関係は図 A3 のようになった。この図から、波長 λ と画素数 x の関係は以下の式で表される。ただしビニングをした際には x を 2 倍する。

$$\lambda = 26.46x \quad (1)$$

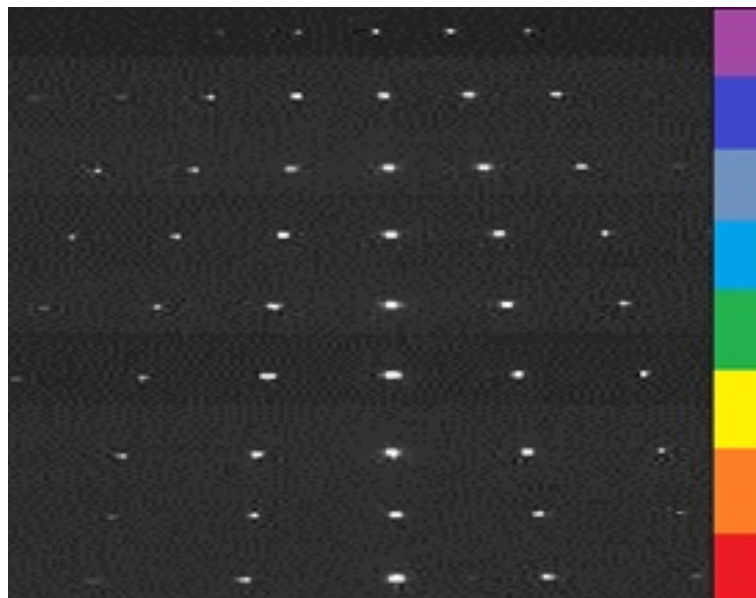


図 A2 単色光の分散の様子。上から 400nm、450nm、500nm、550nm、600nm、650nm、700nm、750nm、800nm である。

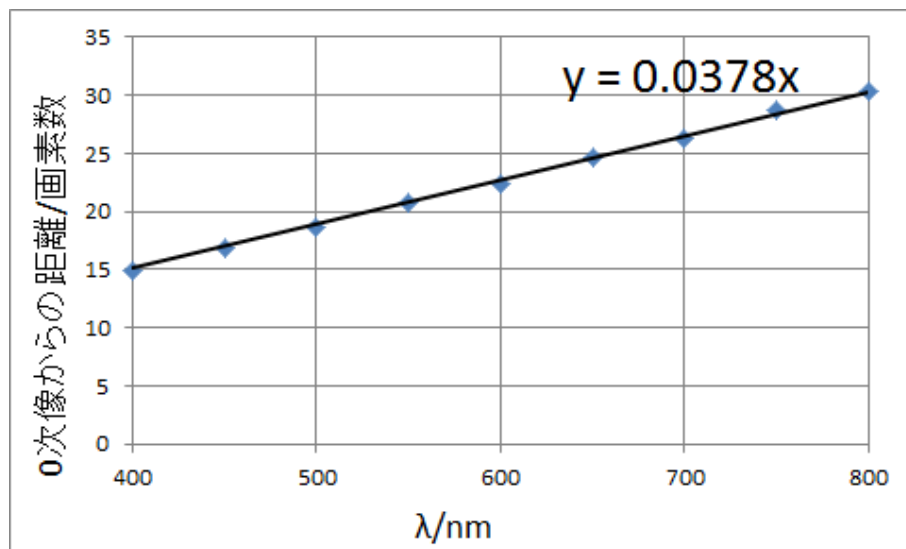


図 A3 波長と 0 次像からの距離の関係。横軸に波長 (nm)、縦軸に 0 次像からの距離を画素数で表している。

さらに、バックグラウンド補正後の 0 次像のカウント値で規格化した -2、-1、1、2 次像のカウント値を次の表 A1 に示す。ただし有効数字は 2 桁とした。表 A1 より、どの波長においても 1 次像が最も明るく、-1、2、-2 の順に暗くなっていることがわかる。また、500 nm で像が最もあかるくなり、波長が長くなるにつれて減衰していることも分かる。700 nm 以降では -2 次像の値が非常に小さくなっているほか、2 次像も背景とほとんど同化していた。

図 A4 の波長と 1 次像 / 0 次像の関係をみると、波長が長くなるほど 0 次像に比べて 1 次像が暗くなり、600 nm 以降では明るさが半分以下になっていることがわかる。また、400 nm、450 nm では 0 次像よりも 1 次像の方が明るいことも分かる。

表 A1 -2～2 次像の各波長でのカウント値

波長/nm	-2 次像	-1 次像	1 次像	2 次像
400	4.8×10^3	1.6×10^4	3.5×10^4	1.1×10^4
450	5.1×10^3	1.9×10^4	3.1×10^4	6.4×10^3
500	7.9×10^3	3.5×10^4	5.0×10^4	1.4×10^4
550	4.6×10^3	1.9×10^4	3.9×10^4	8.0×10^3
600	2.8×10^3	1.8×10^4	2.2×10^4	5.1×10^3
650	3.1×10^3	2.2×10^4	3.1×10^4	6.4×10^3
700	3.9×10^2	9.8×10^3	1.4×10^4	2.5×10^3
750	7.3×10^2	8.7×10^3	1.3×10^4	1.5×10^3
800	3.8×10^2	8.0×10^3	1.1×10^4	8.7×10^2

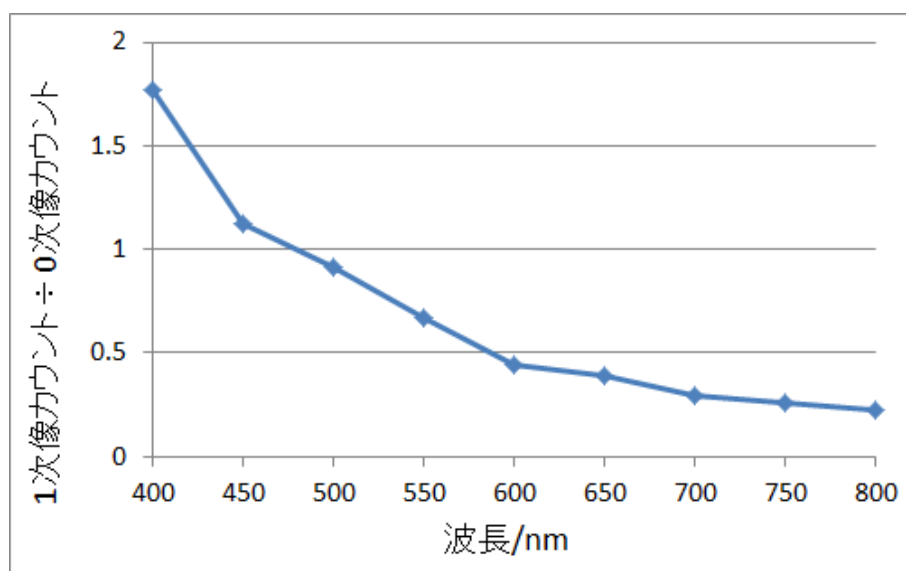


図 A4 波長と 1 次像 / 0 次像の関係。 横軸に波長 (nm)、縦軸に 1 次像 / 0 次像を表している。

B 分光特性評価実験 B

B.1 実験方法

この実験では、実験 A で述べたものと同じ方法で、波長を 450 nm と 800 nm の 2 種類とし、それぞれの波長で視野内 9 か所を 100 フレームずつ撮影する。フォーカスとゲインはそれぞれの波長で調節する。ダークも 100 フレームずつ撮影する。実験 B ではムラ補正のため、白い画面を 100 フレーム撮影し平均したものをフラットとして 1 次処理に用いる。

B.2 解析方法

実験 A と同様。

B.3 結果

各波長での 9 か所の 0 次像と 1 次像の明るさの重心間距離を図 B1 に示す。図 B1 の結果から、重心間距離の平均は 450 nm で 16.93 ± 0.56 、800 nm で 30.35 ± 0.79 となった。(1) 式から波長を計算すると、 452 ± 15 nm、 799 ± 21 nm となり、(1) 式から得られる波長には像の位置によって 20 nm ほどの誤差があることが分かる。一方、図から左上から右下に向かうにつれて 0 次像と 1 次像の間の距離が増加していることも分かる。また、図 B2 では各波長での 9 か所の 1 次像 / 0 次像を示す。図 B2 の結果から、800 nm では検出位置による変化はほぼ見られないことが分かった。しかし、450 nm では最大で約 1.4 倍も値に差があることがわかる。このことから、波長の短い光は視野内の位置によって波長にずれが生じる可能性があることが分かった。

16.37	16.61	16.91
16.79	16.92	17.15
17.08	17.17	17.35

450nm での 0 次-1 次像間の距離

29.70	29.81	30.14
30.05	30.26	30.72
30.51	30.80	31.13

800nm での 0 次-1 次像間の距離

図 B1 各波長での 0 次-1 次像間の距離

0.69	0.69	0.94
0.86	0.84	0.94
0.87	0.91	0.98

450nm での 1 次像 / 0 次像

0.23	0.22	0.20
0.22	0.22	0.20
0.20	0.21	0.20

800nm での 1 次像 / 0 次像

図 B2 各波長での 1 次像 / 0 次像

C 分光特性評価実験 C

C.1 実験方法

実験の様子を図 C1 に示した。図 A1 に示した装置からモノクロメータを取り除き、光源とファイバーの間に青いフィルタ (SCHOTT 社、BG34、2mm) を挟む。ビニングはせず、階調は 16 bit に設定する。フォーカスやゲインを合わせ、視野内 25 か所で 100 フレームずつ撮影する。ダークも 100 フレーム撮影する。

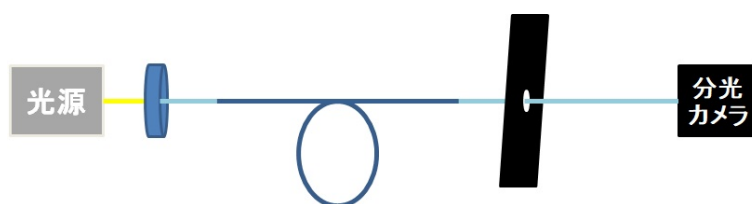


図 C1 実験 C の様子。モノクロメータを外し、光源とファイバーの間に青いフィルタを挟むことで、連続光になっている。

C.2 解析方法

実験 A で述べたのと同様に解析を行うが、フラット補正は行わない。0 次像と 1 次像のそれぞれの合計カウント値を N_0 、 N_1 とし、カウントの和 $N_0 + N_1$ およびカウントの比 $\frac{N_0}{N_1}$ を 25 点それぞれで求める。

C.3 結果

図 C2 はカウント和を中心 (13) での値を 1 として比で表している。また、図 C3 は 0 次像と 1 次像のカウントの比を表している。ノイズが大きく十分な精度のスペクトルが得られない場合、スペクトルカメラを単なる測光に用いることがありうる。この時、図 C2、C3 をもとに、実際の月面衝突閃光や比較星の位置によってカウント値に重みづけをすることで、観測機材による影響を無くし等級などのより正確な値を求めることができる。

1 0.98	2 0.94	3 0.99	4 0.98	5 0.97
6 1.00	7 0.98	8 0.98	9 0.98	10 0.99
11 1.03	12 1.01	13 1.00	14 0.98	15 0.97
16 1.05	17 1.02	18 1.02	19 0.98	20 0.96
21 1.05	22 1.03	23 1.01	24 0.99	25 0.95

図 C2 25 点それぞれでのカウント和。 中心 (13) を 1 とした時の値を表し、左下がやや大きくなっている。

1	0.50	2	0.53	3	0.47	4	0.46	5	0.45
6	0.49	7	0.51	8	0.49	9	0.46	10	0.45
11	0.48	12	0.50	13	0.49	14	0.46	15	0.46
16	0.47	17	0.49	18	0.48	19	0.46	20	0.45
21	0.47	22	0.49	23	0.49	24	0.44	25	0.45

図 C3 25 点それぞれでのカウント比。 全体的に 0.5 前後の値である。

D 分光特性評価実験 D

D.1 実験方法

この実験では前述の分光特性評価実験 C を実際の星を用いて行った。2018 年 11 月 15 日の月面衝突閃光観測後に天頂付近の星 TYC1735-927-1 を、ビニングなし、階調 16 bit、ゲイン 1600、露光時間 25 ms で視野内 25 箇所、100 フレームずつ撮影した。また、設定を変えずにダークを 100 フレーム撮影した。

D.2 解析方法

実験 C と同様に解析を行う。実験 D では、波長と合計カウント値の関係、0 次像と 1 次像の相関、中心との比を求めた。

D.3 結果

図 D1 より、中心 (13) 付近ではカウント和に大きなずれは見られないことが分かった。実験 C では左下が中心と比較してやや大きくなっていたが、今回の結果からはその傾向は見られず、四隅が暗くなっていることがわかる。また、今回の実験では視野内で星の位置をずらす際にコントローラを用いたが、位置を決定した後も架台に内蔵されているモーターがわずかに動いていたため、2、9、21 の撮影時に像が動いてしまっていた。このため、2、9、21 では画像を平均した際に像がぼやけてしまい、カウント和の値が低くなったと考えられる。

図 D2 と図 C3 を比較すると、像が動いていた箇所のうち特に大きく動いていた 2 と 21 ではずれが大きいですが、その他においては同程度の値を示していることがわかる。

1 0.83	2 0.61	3 0.94	4 0.96	5 0.86
6 0.90	7 0.96	8 0.99	9 0.77	10 0.93
11 0.99	12 0.98	13 1.00	14 0.92	15 0.98
16 0.96	17 1.00	18 1.02	19 1.00	20 0.81
21 0.66	22 0.98	23 0.80	24 0.93	25 0.78

図 D1 25 点それぞれでのカウント和。 中心 (13) を 1 とした時の値を表している。

1 0.45	2 0.67	3 0.47	4 0.43	5 0.38
6 0.49	7 0.51	8 0.48	9 0.48	10 0.42
11 0.57	12 0.48	13 0.48	14 0.49	15 0.42
16 0.56	17 0.49	18 0.47	19 0.45	20 0.52
21 0.69	22 0.50	23 0.59	24 0.45	25 0.43

図 D2 25 点それぞれでのカウント比。 $\frac{N_0}{N_1}$ を有効数字 2 桁で表示している。

図 D3～D7 では中心 (13) の値で規格化した際の各波長におけるカウントの比を行ごとに示している。これらを見ると、400 nm 以下では中心との比が大きくずれていることがわかる。また、700 nm 付近でも特に最も左の列 (青線) でずれが大きくなっているものが見受けられた。さらに、最も右の列 (赤線) においては全体的にずれが大きくなっていることも分かった。このことから、検出位置によってはある波長帯でのカウント値の信頼性が低くなる可能性があることが考えられる。ただし、中央の列 (黄線) ではどの行においても大きなずれがなかった。この結果を表 1 に適応させると、D、F、G、I、L 閃光の波長に対するカウント値は信頼性が高いといえる。

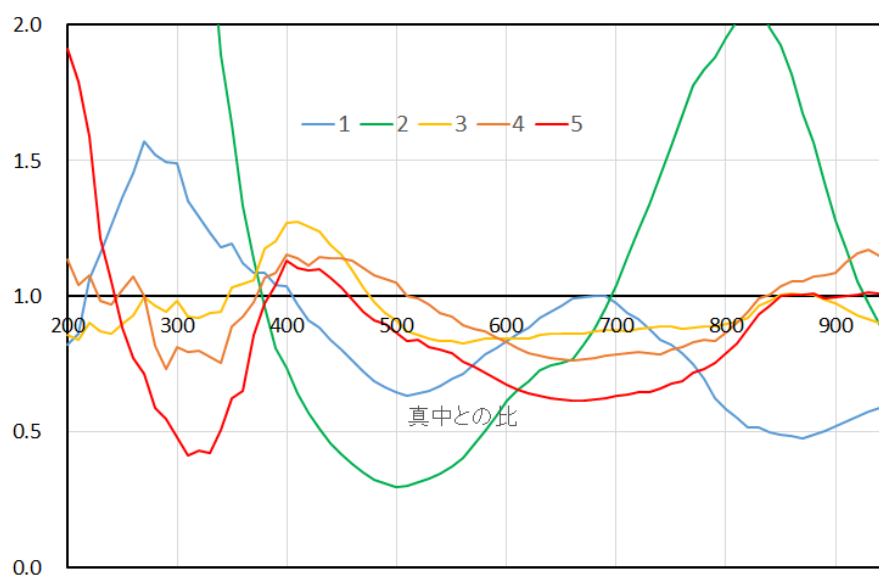


図 D3 1 行目の各波長でのカウントの比。 中心 (13) との比を示している。

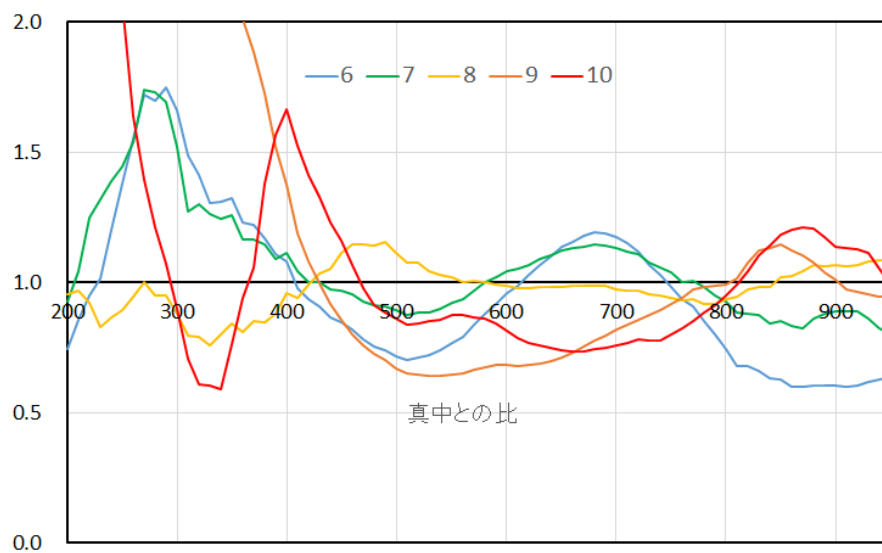


図 D4 2 行目の各波長でのカウントの比。 中心 (13) との比を示している。

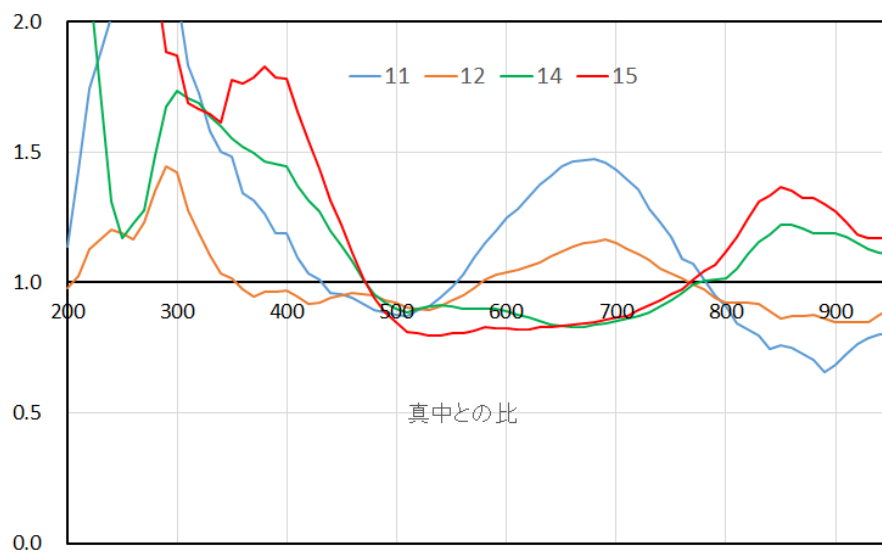


図 D5 3 行目の各波長でのカウントの比。 中心 (13) との比を示している。13 は中心のため省略している。

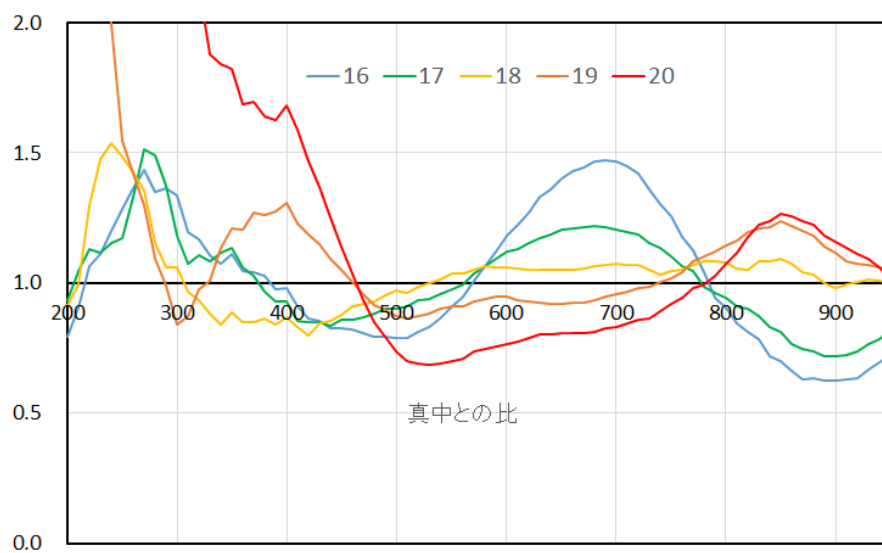


図 D6 4 行目の各波長でのカウントの比。 中心 (13) との比を示している。

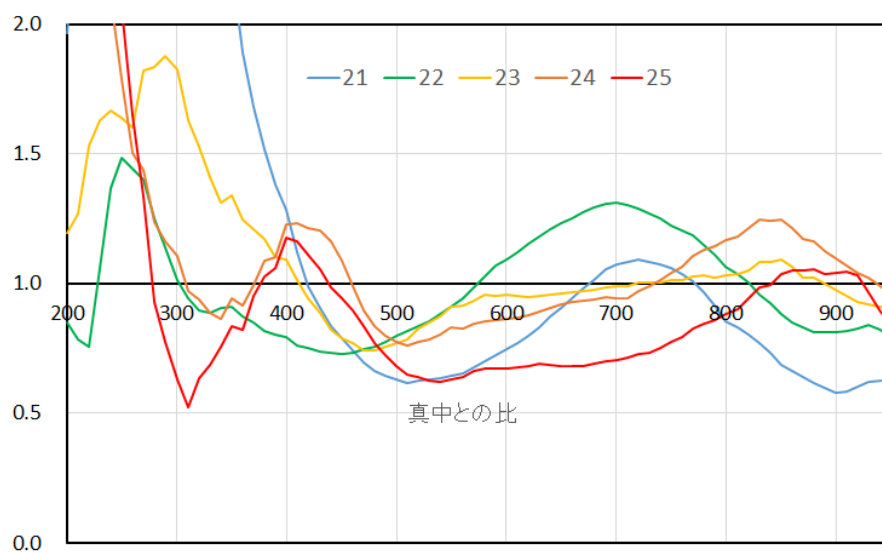


図 D7 5 行目の各波長でのカウントの比。 中心 (13) との比を示している。